第 37 卷第 24 期
2017 年 12 月
生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.24
Dec.,2017

DOI: 10.5846/stxb201611222379
罗艳,贡璐,朱美玲,安申群.塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征.生态学报,2017,37(24):8326-8335.
Luo Y,Gong L,Zhu M L,An S Q.Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert.Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8326-8335.

塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征

罗　艳[1,2],贡　璐[1,2,*],朱美玲[1,2],安申群[1,2]
1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐　830046
2 绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐　830046

摘要: 分析了塔里木河上游荒漠区灌木植物叶片和土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量特征以及二者之间的相关性,旨在阐明荒漠植被在极端环境下养分循环及限制状况,为塔里木河上游荒漠生态系统的恢复与保护提供理论依据。以塔里木河上游多枝柽柳(*Tamarix ramosissma*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)4 种荒漠灌木植物叶片和土壤为研究对象,分析植物叶片和土壤 C、N、P 生态化学计量特征及其相关性。结果表明:在 4 种不同荒漠灌木植物叶片中柽柳叶片的 C 含量为(484.77±59.74)mg/g,显著高于其他灌木植物($P < 0.05$);铃铛刺的 N 含量是(14.20±1.58)mg/g,显著高于其他灌木植物($P < 0.05$);柽柳叶片的 P 含量为(0.54±0.16)mg/g,显著低于其他灌木植物($P < 0.05$)。4 种灌木植物叶片 C/N 比值大小为黑果枸杞>柽柳>铃铛刺>盐穗木,且黑果枸杞的 C/N 比值显著最高为(37.83±7.74)($P < 0.05$);C/P 为柽柳>铃铛刺>盐穗木>黑果枸杞,盐穗木和黑果枸杞的 C/P 显著低于其他灌木($P < 0.05$),其比值分别为(379.76±158.63)和(383.47±128.95);N/P 为柽柳>铃铛刺>盐穗木>黑果枸杞,柽柳的 N/P 比值显著最高为(22.34±4.60)($P < 0.05$)。4 种不同荒漠灌木土壤的有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比特征均未表现出显著的差异。由相关性分析可知柽柳叶片仅 P 含量与土壤 TP 含量呈现出显著正相关($P < 0.05$);铃铛刺叶片 C 含量与土壤 TN、叶片 P 含量与土壤 TN/TP 均呈显著负相关($P < 0.05$),而叶片 C 含量与土壤 TN/TP 呈极显著负相关($P < 0.01$);盐穗木和黑果枸杞叶片化学计量特征与土壤的化学计量特征均未表现出显著相关性($P > 0.05$)。说明植物叶片化学计量特征并非是由土壤养分含量特征直接决定的,更多受植物自身遗传特性的影响,体现了荒漠灌木植物对极端生境的适应性。

关键词: 塔里木河上游;荒漠灌木植物;土壤;化学计量学

Stoichiometry characteristics of leaves and soil of four shrubs in the upper reaches of the Tarim River Desert

LUO Yan[1,2], GONG Lu[1,2,*], ZHU Meiling[1,2], AN Shenqun[1,2]
1 *College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
2 *Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi* 830046, *China*

Abstract: The main purpose of this study was to determine the concentration and the stoichiometric ratios of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in the leaves of four shrubs and the soil in the upper reaches of the Tarim River Desert. The correlation of C, N, and P stoichiometric ratios between leaves and soils was discussed. Results revealed the adaptation mechanism of desert vegetation to extreme environments and the limiting conditions of soil nutrients and provided scientific reference for restoration and protection of desert ecosystems in the upper reaches of the Tarim River. Four desert shrub

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41461105)
收稿日期: 2016-11-22;　**网络出版日期:** 2017-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gonglu721@163.com

species were used as plant materials. Leaf and soil samples were collected by ground acquisition method and quartation method, respectively, in August 2015. The C, N, and P concentrations in plant leaves and soils, stoichiometric ratios, and their correlations were calculated. The results showed that leaf C concentration was (484.77±59.74) mg/g, which was significantly higher in *Tamarix ramosissima* than in other three shrubs. The leaf N concentration was (14.20±1.58) mg/g, which was significantly higher in *Halimodendron halodendron* than in other shrubs, whereas the leaf P concentration in *T. ramosissima* was (0.54±0.16) mg/g, which was significantly lower than that of other shrubs. The C/N ratio in the leaves was ranked in the order of *Lycium ruthenicum* > *T. ramosissima* > *H. halodendron* > *H. caspica*, and the C/N ratio in *H. caspica* was (37.83±7.74), which was significantly higher than that of other shrubs ($P < 0.05$). The C/P ratio was ranked in the order of *T. ramosissima* > *H. halodendron* > *L. ruthenicum* > *H. caspica*, and the C/P ratio in *L. ruthenicum* and *H. caspica* was (379.76±158.63) and (383.47±128.95), respectively, which was significantly lower than those of the other shrubs. The N/P ratio was *T. ramosissima* > *H. halodendron* > *H. caspica* > *L. ruthenicum*, and the N/P ratio of *T. ramosissima* was (22.34±4.60), which was significantly higher than that of the other shrubs. The concentration and stoichiometric ratio of organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) showed no differences among soils for the four shrubs, and there was no significant difference among SOC, TN, and TP contents in soils ($P > 0.05$). The concentration of P in *T. ramosissima* leaves was positively correlated with soil TP concentration ($P < 0.05$). C concentration and TN concentration in *H. halodendron* leaves were negatively correlated with P and the TN/TP ratio ($P < 0.05$). C concentration in leaves was highly negatively correlated with the soil TN/TP ratio ($P < 0.01$), whereas in *H. caspica* and *L. ruthenicum*, there were no significant correlations between leaf and soil values ($P > 0.05$). There were significant differences in C, N, and P stoichiometric characteristics of the leaves of the four shrubs. The use efficiency of nutrient resources was also different in the plants species. The stoichiometric characteristics of C, N, and P were not significantly different in the four soils for the shrubs, which indicated that the habitat nutrient conditions of the four desert plants were not significantly different. There was no correlation in stoichiometric characteristics between shrub leaves and soil, and it was demonstrated that leaf stoichiometric characteristics were not directly determined by soil nutrient conditions, but affected by heritable characteristics of plants, which reflected the long-term adaptive characteristics of desert shrub plants for extreme habitat environments.

Key Words: upper reaches of the Tarim River; desert shrub; soil; stoichiometry

生态化学计量学为研究植物元素循环及其与环境的相互作用提供了新思路。C、N 和 P 是植物生长发育的重要元素,同时也是衡量土壤肥力的关键指标[1-2]。研究植物叶片和土壤 C、N、P 及其化学计量比的变化特征,可以深入了解植物生长过程中对于资源的利用及土壤养分循环的状况,揭示植物与环境之间相互平衡制约的关系[3]。近年来,国内外生态化学计量学发展迅速,研究内容跨越不同地域,涉及不同生态系统类型。相关报道不仅包括森林、草原等生态系统中不同植被类型,不同植物器官、土壤等的化学计量特征,同时也涉及植物叶片养分含量特征与环境要素之间关系等的研究[4-8]。然而对荒漠生态系统中植物与土壤相互关系的关注较少,尤其是针对干旱区灌木植物叶片与土壤化学计量特征关系的研究鲜有报道[8-9]。荒漠生态系统土壤养分和水分匮乏,土壤理化特性具有极强的空间异质性,在此条件下荒漠植被对养分元素的需求和对环境的适应发生了变化[10]。通过生态化学计量学来研究荒漠植物其养分吸收利用和对环境的响应机制成为了当前干旱区生态学研究的重要内容。

塔里木河是保证塔里木盆地绿洲生态安全、经济发展和人民生活的生命线,其上游地区是生态与环境问题最为突出的地区之一[11]。灌木植物对干旱、盐碱的环境具有较强的适应性,在塔里木河上游防风固沙和绿色生态建设中发挥着重要的作用[12-13]。近年来在全球变化和人类活动的双重影响下,上游原本脆弱的生态环境加之大规模的水土资源开发利用,使得河流两岸地下水位持续下降,灌木林数量大幅削减,土壤贫瘠化、

沙化、盐渍化的现象愈发严重[11,14]。不同灌木植物在养分限制、水盐胁迫的恶劣条件下,其元素化学计量特征及对生境的适应性具有异质性。本研究对塔里木河上游4种荒漠灌木植物叶片和土壤C、N、P化学计量特征及二者之间的相关性进行了分析,探讨了土壤对4种不同荒漠灌木植物叶片C、N、P化学计量特征的影响,旨在阐明荒漠区植被对极端环境的适应机制以及土壤养分元素的循环、平衡及限制状况,以期为塔里木河上游荒漠生态系统的恢复与保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔里木河流域上游荒漠区,地处塔克拉玛干沙漠北缘,天山中段南麓,地跨80°10′—84°36′E,40°25′—41°10′N。该区域属典型的暖温带大陆性干旱荒漠气候,春、夏季干旱少雨且多大风天气,风沙灾害频繁,冬季严寒,地表蒸发强烈,降水稀少。此处年均气温10.4℃,年均降水量为50.4 mm,年均蒸发量1880.0 mm,平均日照时数2729.0h。土壤组成以砂粒为主,有机质(4.43—6.40 mg/g)、N(0.45—0.61)mg/g、P(0.57—0.63)mg/g等养分含量偏低,且多在表层聚积。该区植被组成简单、稀疏,乔灌草3层结构明显。代表性的植物有胡杨(*Populus euphratica*)、柽柳(*Tamarix ramosissma*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、芦苇(*Phragmites australis*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch)、盐穗木(*Halostachys caspica*)及河西菊(*Hexinia polydichotoma*)等。

1.2 野外采样

于2015年8月在垂直于塔里木河上游河道方向由西向东的区域对4种灌木植物叶片及其土壤进行采样。基于代表性和典型性原则,在海拔、坡向等地形因子基本一致的立地环境下,选择荒漠区内分布的4种典型灌木群落类型。在每个样地设置5个20 m×20 m大样方,每个样地间隔不小于1 km,样方取样面积大小为15 m×15 m,对各群落优势种和土壤(多枝柽柳、盐穗木、黑果枸杞和铃铛刺)样品进行采集,植物和土壤的每个样品重复3次。依据植物生长状况,在样方内采集植株中上部健康成熟(无损、向阳、去除叶柄)的新鲜叶片50 g,每种植物样品均采集5株(采集的4种荒漠灌木植物特征见表1),将采集的植物叶片装入放有适量干燥剂的信封中并标号。同时依据植物根系分布的层次,在每个样方内采用四分法采集植物冠下0—20 cm的表层土壤样品(去除枯枝落叶和石块后)100 g装入编好号的密封袋中,用于土壤养分含量的测定。研究区采样前20 d无降雨。

表1 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物名录

Table 1 4 kinds of shrubs plants in the upper reaches of the Tarim River desert

植物种 Species	科 Family	属 Genus	株高/m Plant height	频度 Frequency	盖度 Coverage
多枝柽柳 *Tamarix ramosissma*	柽柳科	柽柳属	2.98	0.83	0.22
盐穗木 *Halostachys caspica*	藜科	盐穗木属	0.93	0.22	0.24
黑果枸杞 *Lycium ruthenicum*	茄科	枸杞属	0.58	0.11	0.10
铃铛刺 *Halimodendron halodendron*	豆科	铃铛刺属	0.58	0.22	0.02

1.3 实验方法

将野外采集的植物叶片样品置于85℃条件下烘干至恒重。植物叶片用粉碎机磨碎后过80目筛,称重装袋封存,用于测定植物叶片的全碳(C)、全氮(N)和全磷(P)的含量。植物叶片全碳含量采用重铬酸钾容重法—外加热法测定,全氮含量采用凯氏定氮法测定,全磷含量采用钼锑抗比色法测定。C、N、P测定结果以单位质量的养分含量表示(mg/g),C、N、P化学计量比均采用摩尔比表示。

采集的土壤样品自然风干,剔除土样中的植物根系和石块,研磨过60目筛,装袋待测。采用常规方法测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)。土壤有机碳采用重铬酸钾滴定法;全氮采用凯氏定氮法;全磷

采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法。对每个土样的指标进行 3 次测定,结果取其标准差和均值。

1.4　数据处理

采用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析。对 4 个不同灌木植物叶片的 C、N、P 元素含量,土壤 SOC、TN、TP 含量,及其化学计量比(叶片 C/N、C/P、N/P,土壤 SOC/TN、SOC/TP、TN/TP)进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。利用 Levene′s test 检验方差齐性与否,方差齐性时使用 Duncan 法进行多重比较,方差不齐时使用 T2 Tamhane′s test 进行多重比较($\alpha = 0.05$)。植物叶片 C、N、P 含量采用幂函数模型拟合。叶片 C、N、P 元素含量与土壤因子的关系用 Pearson 相关分析。图表中数据为平均值±标准误。

2　结果与分析

2.1　荒漠灌木植物叶片 C、N、P 化学计量特征分析

4 种不同荒漠灌木植物叶片 C、N、P 含量及其化学计量特征存在一定的差异性(图 1)。4 种不同荒漠灌木植物叶片的 C 含量高低顺序为柽柳>铃铛刺>黑果枸杞>盐穗木,且柽柳的 C 含量平均值为(484.77±59.74)mg/g,显著高于其他灌木植物($P < 0.05$)。4 种不同荒漠灌木植物叶片的 N 含量为铃铛刺>盐穗木>柽柳>黑

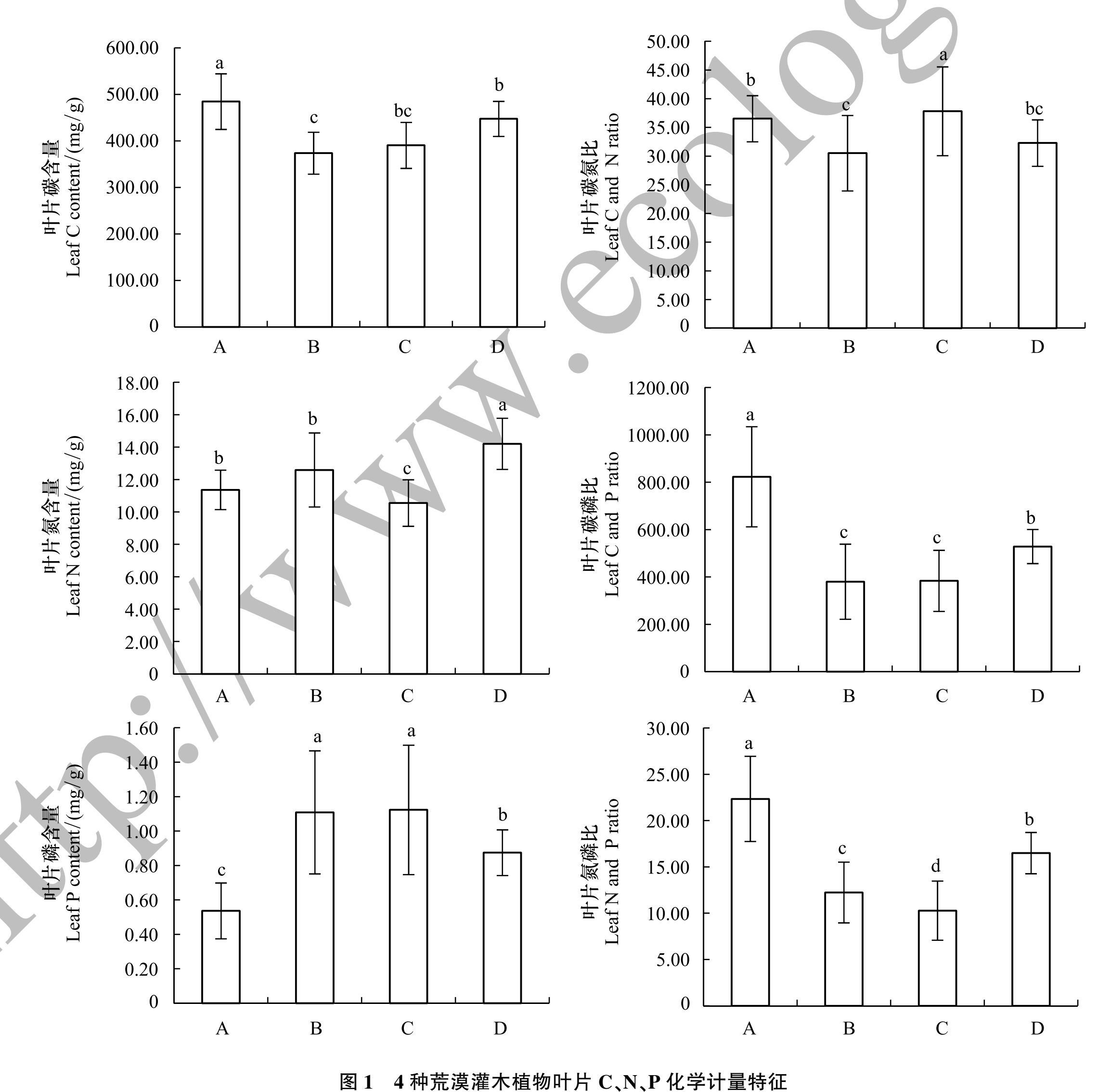


图 1　4 种荒漠灌木植物叶片 C、N、P 化学计量特征

Fig.1　Leaf C、N、P stoichiometric characteristics of four different desert shrubs

A: 柽柳 *Tamarix ramosissma*; B: 盐穗木 *Halostachys caspica*; C: 黑果枸杞 *Lycium ruthenicum*; D: 铃铛刺 *Halimodendron halodendron*;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

果枸杞,其中铃铛刺的 N 含量平均值为(14.20±1.58)mg/g,显著高于黑果枸杞、盐穗木和柽柳($P < 0.05$)。各荒漠灌木植物叶片 P 含量为黑果枸杞>盐穗木>铃铛刺>柽柳,但黑果枸杞和盐穗木的 P 含量无显著差异,柽柳 P 含量平均值为(0.54±0.16)mg/g 显著低于其他灌木植物($P < 0.05$)。

4 种不同荒漠灌木植物叶片 C/N、C/P 和 N/P 的化学计量比值也存在一定的差异。C/N 比值大小顺序为黑果枸杞>柽柳>铃铛刺>盐穗木,黑果枸杞的 C/N 平均值为(37.83±7.74),显著高于其他荒漠灌木植物($P <0.05$)。4 种不同荒漠灌木植物叶片的 C/P 呈现出柽柳>铃铛刺>盐穗木>黑果枸杞的趋势,盐穗木和黑果枸杞的 C/P 平均值分别为(379.76±158.63)和(383.47±128.95),二者无显著差异但却显著低于柽柳和铃铛刺($P < 0.05$)。4 种不同荒漠灌木植物叶片 N/P 为柽柳>铃铛刺>盐穗木>黑果枸杞,且柽柳的 N/P 平均值为(22.34±4.60),显著高于其他 3 种灌木植物($P < 0.05$)。

塔里木河上游 4 种荒漠灌木植物叶片 C、N、P 元素含量之间的相关性表现为:C 含量与 P 含量不相关($P >0.05$)($y=5.4104x^{-0.309}$, $R^2=0.0116$),C 含量与 N 含量呈现极显著的正相关($P < 0.01$)($y=1.2438x^{0.3765}$, $R^2=0.098$),N 含量与 P 含量为显著正相关关系($P < 0.05$)($y=0.1245x^{0.7688}$, $R^2=0.1034$)(图 2)。塔里木河上游 4 种荒漠灌木植物叶片 C 与 N、N 与 P 元素含量之间均具有显著的幂指数为正值的幂函数关系,表明不同生活型荒漠植物叶 C(N)和 P(N)含量分别随叶片 N(C)和 N(P)含量的增加而显著增大。N 元素和 P 元素之间具有最大的幂指数 0.1034,C 和 N 元素的幂指数最小仅为 0.098,表明 N 元素含量随 P 元素含量增大而增大的趋势比 C 和 N 元素更明显。

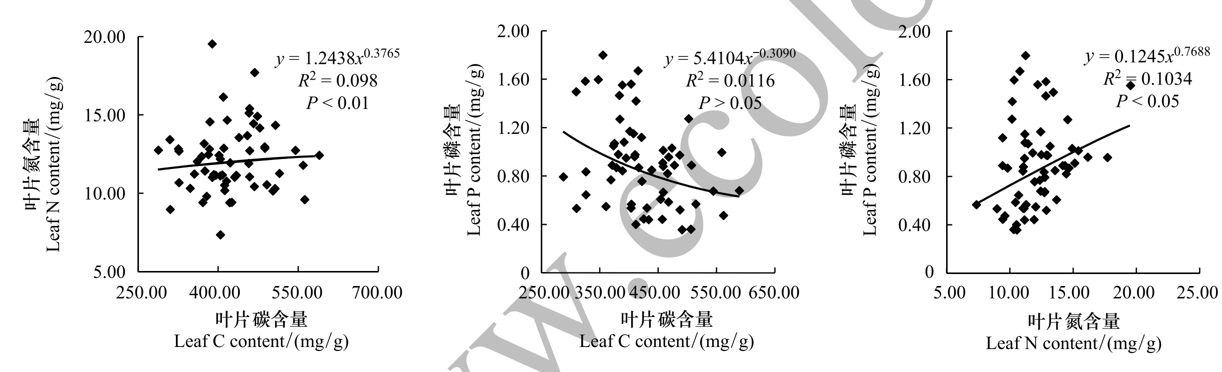


图 2　4 种荒漠灌木植物叶片 C、N、P 含量的关系

Fig.2　Relationships between leaf C、N and P contents of four desert shrubs

2.2　荒漠灌木土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征分析

由表 2 可以看出,4 个荒漠灌木土壤的 SOC(有机碳)、TN(全氮)、TP(全磷)含量及其化学计量比之间显著差异较小。SOC 含量在 4 种灌木土壤中均无显著差异($P > 0.05$),其中柽柳的 SOC 最高(6.40±5.51)mg/g,黑果枸杞最低(4.43±3.34)mg/g。土壤 TN 含量最高的是铃铛刺(0.61±0.18)mg/g,但与其他 3 种灌木的土壤 TN 含量相比无明显差异($P > 0.05$)。4 种灌木土壤的 TP 含量均未表现出显著的差异性($P > 0.05$),盐穗木

表 2　4 个不同荒漠灌木土壤 C、N、P 化学计量特征

Table 2　Stoichiometrics of soil C、N、P in four different habits desert shrubs

植物种 Species	有机碳 SOC/(mg/g)	全氮 TN/(mg/g)	全磷 TP/(mg/g)	有机碳 SOC/(mg/g)	全氮 TN/(mg/g)	全磷 TP/(mg/g)
柽柳 *Tamarix ramosissma*	6.40±5.51[a]	0.45±0.28[a]	0.57±0.07[a]	13.51±9.57	11.61±10.18	0.80±0.51
盐穗木 *Halostachys caspica*	6.00±5.29[a]	0.49±0.22[a]	0.66±0.14[a]	11.88±9.22	9.37±8.57	0.78±0.42
黑果枸杞 *Lycium ruthenicum*	4.43±3.34[a]	0.49±0.20[a]	0.65±0.17[a]	9.77±6.99	7.09±5.72	0.81±0.38
铃铛刺 *Halimodendron halodendron*	6.18±5.45[a]	0.61±0.18[a]	0.63±0.16[a]	10.98±9.71	10.34±9.57	1.03±0.46
全部物种 All species	5.75±4.91	0.51±0.23	0.63±0.14	11.54±8.82	9.60±8.62	0.85±0.45

同列不同字母表示不同土壤因子特征差异显著($P < 0.05$);SOC(有机碳)、TN(全氮)、TP(全磷)

的 TP 最高(0.66±0.14)mg/g,柽柳最低(0.57±0.07)mg/g。此外,4 种灌木植物所在的土壤 SOC/TN 和 SOC/TP 均是柽柳高于其他灌木,而 TN/TP 则是黑果枸杞高于其他灌木。

2.3　荒漠灌木植物叶片与土壤化学计量特征的相关关系

由表 3 可知,4 种不同荒漠灌木植物叶片和土壤的化学计量特征的相关关系表明,大部分土壤化学计量特征与植物叶片之间的相关性不显著。从单个植物分析可知,柽柳叶片仅 P 含量与土壤 TP 含量呈现出显著正相关关系,叶片 C、N 含量及化学计量比与土壤无显著关系。铃铛刺叶片 C 含量与土壤 TN 呈显著负相关,与土壤 TN/TP 呈极显著负相关,叶片 P 含量与土壤 TN/TP 表现为显著负相关关系。而盐穗木和黑果枸杞叶片化学计量特征均未与土壤的化学计量特征表现出显著的相关性。从全部物种来看,4 种灌木植物 60 个叶片的 C/P 和 N/P 都与其土壤 TP 含量间呈显著负相关关系,其他叶片化学计量特征未与其土壤有显著的相关性。可见 4 种不同荒漠灌木植物叶片的 C、N、P 元素含量及其比值与土壤养分含量无直接关系,4 种灌木植物化学计量特征的变化更多倾向于是它们自身性状特征的反映。

表 3　4 种不同灌木植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征的相关性

Table 3　Correlation relationship between C、N、P stoichiometry characteristics of the four different desert shrubs and soil

物种 Species	叶片 Leaf	SOC	TN	TP	SOC/TN	SOC/TP	TN/TP
柽柳	C	0.05	−0.15	0.25	0.11	0.02	−0.18
Tamarix ramosissma	N	0.24	0.37	0.18	−0.14	0.24	0.38
	P	−0.16	−0.09	0.557*	−0.43	−0.16	−0.11
	C/N	0.05	0.05	−0.37	0.19	0.05	0.06
	C/P	0.18	0.14	−0.41	0.45	0.18	0.15
	N/P	0.23	0.18	−0.39	0.48	0.23	0.19
盐穗木	C	0.31	0.41	0.38	0.09	0.30	0.26
Halostachys caspica	N	−0.35	−0.28	0.29	−0.35	−0.36	−0.29
	P	−0.27	−0.15	−0.13	−0.19	−0.24	−0.02
	C/N	0.45	0.40	0.03	0.30	0.45	0.33
	C/P	0.41	0.25	0.07	0.22	0.44	0.16
	N/P	0.16	0.00	0.13	0.03	0.17	−0.09
黑果枸杞	C	−0.18	0.10	0.27	−0.25	−0.22	−0.01
Lycium ruthenicum	N	0.25	−0.28	0.17	0.35	0.22	−0.32
	P	0.19	−0.19	0.17	0.36	0.05	−0.21
	C/N	−0.23	0.36	0.03	−0.39	−0.22	0.31
	C/P	−0.19	0.34	−0.15	−0.41	−0.08	0.34
	N/P	−0.08	0.09	−0.21	−0.21	0.05	0.14
铃铛刺	C	0.26	−0.57*	0.35	0.43	0.13	−0.65**
Halimodendron halodendron	N	0.13	−0.47	0.14	0.19	0.14	−0.42
	P	0.22	−0.42	0.38	0.26	0.19	−0.57*
	C/N	0.03	−0.04	−0.03	0.09	−0.03	−0.06
	C/P	−0.19	0.12	−0.41	−0.11	−0.20	0.36
	N/P	−0.23	0.21	−0.42	−0.22	−0.18	0.46
全部物种	C	0.15	−0.01	0.04	0.14	0.15	−0.05
All species	N	0.05	0.03	0.18	−0.03	0.05	−0.01
	P	−0.10	−0.08	0.25	−0.08	−0.16	−0.13
	C/N	0.05	0.14	−0.07	0.03	0.05	0.12
	C/P	0.05	−0.15	0.25	0.11	0.02	−0.18
	N/P	0.24	0.37	0.18	−0.14	0.24	0.38

* $P<0.05$ 水平下显著, * * $P<0.01$ 水平下显著

3　讨论

3.1　植物叶片 C、N、P 元素化学计量特征

C 是植物体内干物质组成和光合作用最主要的元素,N 和 P 是植物体内各种蛋白质和遗传物质重要的组

成元素[15-16]。塔里木河上游荒漠区 4 种荒漠灌木植物叶片的 C、N、P 含量总体较低，且明显低于全球和全国植物叶片的 C、N、P 含量平均水平[17-18]。本研究中塔里木河上游荒漠区生态环境恶劣，土壤养分含量低，而灌木植物所需大部分的养分元素都来源于外界环境，当研究区水分减少，养分来源受阻时，灌木植物对养分的吸收和利用速率减慢，因此叶片所能积累的有效养分含量将会降低，这与牛得草等[14]人对阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C∶N∶P 化学计量比的研究结果相同。C/N 和 C/P 作为植物重要的生理指标，代表着植物吸收营养元素时所能同化碳的能力和植物固碳效率的高低[18]。4 种荒漠灌木植物叶片整体的 C/N 比全球高 1.55倍，C/P 比全球高 2.28 倍[19]，说明在养分贫瘠的生境中，塔里木河上游 4 种荒漠灌木具有较高的固碳优势和养分利用策略且同化碳的能力较强，胡启武等[19]和 Rong 等[20]的研究结果也表明叶片 C/N 和 C/P 比值较高的植物，在固碳和养分利用策略等方面都具有优势。植物叶片的 N/P 被认为可以作为判断环境对植物生长的养分供应状况的指标[20-21]。目前用 N /P 阈值作为指示植物生长受 N 或 P 元素限制已得到普遍认可，当 N/P 在 14—16 时，植物受 N 和 P 共同限制[9, 22]。这进一步验证本研究中 4 种荒漠灌木植物受 N 和 P 元素共同作用，但其临界值需要通过施肥实验进一步确定。

塔里木河上游 4 种荒漠灌木植物叶片间 C、N、P 化学计量特征存在明显差异。说明灌木植物物种之间存在差异性，对资源的利用效率和不利环境的适应策略也存在一定的差异性[23]，而这种差异则体现在 C、N、P 化学计量特征上。4 种灌木植物中柽柳叶片 C 元素的积累量最高，这是因为柽柳的叶片呈鳞片状，且一般抱茎而生，形成特殊了茎-叶愈合体，这是一种具有高光效的器官，能增强柽柳的光合作用，提高柽柳叶片合成有机物质的能力[24-25]，4 种灌木植物中铃铛刺叶片的 N 含量最高。铃铛刺是豆科植物，具有生物固氮作用，可以通过与其共生的根瘤菌固定大气中氮，对氮元素具有较强的获取能力和利用效率，宋彦涛等[26]研究结果显示豆科植物叶片具有较高的氮含量。而 P 含量在黑果枸杞中较高，8 月处于花果期的黑果枸杞需要更多的 P 元素来完成繁殖生长的过程。此外当受极端环境胁迫时，黑果枸杞其叶片将产生具有保护机制的蛋白酶等含氮物质来抵抗不利环境，而蛋白酶的形成又需要大量的核酸的复制和转录[26-27]，郝媛媛等[27]人对黑果枸杞的研究表明，黑果枸杞的肉质化叶片，能充分利用生境中的养分来适应荒漠气候。这体现了黑果枸杞是对寡养生境的适应能力。本研究中，黑果枸杞的 C/N 最高，柽柳 C/P 最高，相比其他植物他们叶片中 N、P 含量较低，C 含量却相对较高，显示了他们在养分贫瘠的生境中的较高的固碳优势和养分利用策略。另外 4 种灌木植物叶片 N/P 之间也存在显著差异，其中柽柳的最大且大于 16，黑果枸杞的最小且小于 14，表明柽柳和黑果枸杞相比于其他植物分别受 P 和 N 元素的限制作用最大。

叶片 C 与 N (P)的显著负相关性，叶片 N 与 P 的正相关性是高等陆生植物 C、N、P 元素计量的普遍规律之一，体现了叶片属性间的经济策略[20, 28]。但本研究中植物叶片 C 与 N 的相关性与上述规律不同，这说明塔里木河上游荒漠植物在固 C 过程中对养分(N、P 等)的利用策略与其他植物有所不同，这与 Rong 等[20]的研究结果不同，但与张珂等[15]对阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的研究结果一致。本研究中 N 与 P 呈正相关关系这与上述规律相符，表明塔里木河上游荒漠植物叶片 N、P 元素变化的具有协同性，这是植物适应环境，稳定健康生长的特征，宋彦涛等[26]和李征等[28]的研究结果也说明了这一规律。

3.2 土壤 C、N、P 元素化学计量特征

土壤化学计量特征反映了土壤有机质组成和质量程度，是表征土壤内部 C、N、P 元素循环的重要指标[29-30]。本研究中灌木土壤的整体的 C、N、P 含量较低(5.75、0.51、0.63 mg/g)，远低于全国(11.12、1.06、0.65 mg/g)水平[19, 30]，可知研究区土壤 C、N、P 元素极为贫瘠。土壤 C 和 N 主要来源于土壤有机质含量和凋落物的分解，受植物、水热、母质等的影响较大[3, 31]。由于水分等条件的缺失，研究区植物形成的凋落物相对较少，致使输送到土壤中的有机质含量降低，这与李婷等[23]和张广帅等[29]的研究结果相同，因此土壤 C、N 含量相对偏低。土壤 P 是一种沉积性元素，受成土母质、气候等的影响，主要来源于岩石分化[32]。研究区干旱少雨等气候条件不利于岩石分化，因此土壤 P 含量较低。土壤 C/N、C/P 和 N/P 能很好地指示土壤养分状况[33]，本研究土壤 C/N、C/P、N/P 值(11.54、9.60、0.85 mg/g)低于全国水平(12.01、25.77、2.15 mg/g)[19, 29]，

这主要是由于研究区植物凋落物对土壤的反馈作用减少,土壤中有机质含量较低,土壤养分含量较差。俞月凤等[34]和 Ren 等[35]研究表明水热条件的缺失,使得植物形成的凋落物也不断减少,致使输送到土壤中凋落物分解合成的有机质含量降低植物的凋落物也在减少,输送到土壤中凋落物合成的有机质含量降低。

4 种荒漠灌木植物各土壤 C、N、P 化学计量特征之间差异性不大。各灌木土壤 C、N 和 P 含量均无显著差异,这与研究区土壤本身的养分条件以及植物凋落物对土壤的反馈较少有关。因此在相同的环境背景下各灌木土壤的化学计量特征呈现出相同的结果。本研究 4 种灌木土壤当中柽柳的 C/N 高于其他灌木土壤,土壤 C/N 与有机质分解速率呈反比[36],表明柽柳土壤有机质分解速率最小。而土壤 C/P 是磷有效性高低的指标[37],4 种灌木土壤中柽柳的 C/P 高于黑果枸杞,所以黑果枸杞土壤中土壤磷的有效性更高。土壤 N/P 是养分限制类型的预测指标,4 种灌木土壤的 N/P 不同,说明各灌木土壤之间存在不同的养分限制。

3.3　植物与土壤 C、N、P 化学计量特征的相关性

植物与土壤作为生物地球化学循环的不同环节,两者之间存在必然的联系,植物体内养分含量体现了植物对环境适应特征,土壤养分条件反映了植物的营养状况[38]。植物体中 C、N、P 元素主要来源于土壤,叶片 C、N、P 含量与土壤 C、N、P 含量具有一定的相关性,其含量高低与土壤中养分含量密切相关。李从娟等[37]研究表明在自然条件下植物的生境存在异质性,土壤养分也具有明显的差异性,而这种差异则会影响植物的叶片的化学计量特征[2, 37]。但本研究中,4 种荒漠灌木土壤 C、N、P 化学计量特征之间均无显著的差异,且不同荒漠灌木植物叶片与土壤化学计量特征均无明显的相关性,可知土壤养分对这 4 种灌木植物的直接影响不大,戚德辉等[39]与本文研究结果相同。植物叶片的化学计量特征更多的是与物种及植物自身对生境的适应性有关,更倾向于是一种物种性状,并不是土壤养分限制所引起的[39]。当水分、养分元素相对匮乏的条件下,塔里木河上游荒漠灌木植物形成了具有自身独特的化学计量特征和生理生态,体现了荒漠灌木植物对极端环境具有相对稳定的适应能力。

但从单个物种而言,植物叶片和土壤化学计量特征间却存在一定的相关性。例如,本研究中柽柳叶片 P 含量与土壤 P 含量具有正相关相性,可知 P 对柽柳生长的限制作用,土壤中 P 含量的高低在很大程度上决定了柽柳植物叶片对 P 的吸收。徐露燕等[9]和 Yan 等[40]研究表明,当植物生长受某种元素限制,其叶片内该元素浓度就会与土壤提供此养分的能力呈正相关[22,39]。此外,铃铛刺叶片的 C 含量和 P 含量分别与土壤 TN 和 TN/TP 表现出相关性,可见土壤养分对铃铛刺的生长具有一定作用。同一种植物对不同养分元素利用和消费策略的影响也会不同[39-40],影响骆驼刺植物叶片化学计量的因素与其土壤养分条件密不可分。而盐穗木和黑果枸杞叶片化学计量特征与土壤的化学计量特征均未表现出任何的相关性,由此表明二者化学计量特征并不是由土壤养分含量特征直接决定的,而是与盐穗木和黑果枸杞自身遗传特性有关,这体现了荒漠植物对生境独特的适应机制,这与肖遥等[10]结果相同。

4　结论

综上所述,本研究测定了塔里木河上游 4 种荒漠灌木植物叶片与土壤 C、N、P 含量及其化学计量比特征,分析了 4 种荒漠灌木植物和土壤叶片生态化学计量特征的相关性,从而得出以下结论。

(1) 4 种荒漠灌木植物叶片的 C、N、P 元素含量总体较低,植物的生长更倾向于受 N 和 P 共同限制。4 种荒漠灌木植物间存在显著差异,对养分资源的利用效率也不尽相同,从而导致了它们叶片间 C、N、P 含量化学计量特征也存在显著差异。

(2) 4 荒漠灌木土壤间 C、N、P 化学计量特征差异不显著,可知 4 种植物所在生境的养分状况无显著差异。说明在相同的环境背景下,各灌木土壤的化学计量特征也不存在明显差异。

(3) 4 种灌木植物叶片与所在土壤化学计量特征的相关性不大,说明植物叶片化学计量特征并非是由土壤养分含量特征直接决定的,而更多是受植物自身遗传特性的影响,同时也体现了荒漠灌木植物在土壤养分相对匮乏的条件下,形成了自身独特的生理生态和生态化学计量特征,并具有相对稳定的适应特性。

参考文献(References):

[1] González-Alcaraz M N, Egea C, Jiménez-Cárceles F J, Párraga I, María-Cervantes A, Delgado M J, Álvarez-Rogel J. Storage of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soil-plant system of *Phragmites australis* stands from a eutrophicated Mediterranean salt marsh. Geoderma, 2012, 185-186: 61-72.

[2] 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 659-665.

[3] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(7): 1898-1906.

[4] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.

[5] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的C:N:P化学计量学特征. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.

[6] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 王文栋, 何平, 王慧杰, 谢锦. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性. 生态学报, 2015, 35(23): 7842-7851.

[7] Hao H M, Lu R, Liu Y, Fang N F, Wu G L, Shi Z H. Effects of shrub patch size succession on plant diversity and soil water content in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau. Catena, 2016, 144: 177-183.

[8] Dijkstra F A, Pendall E, Morgan J A, Blumenthal D M, Carrillo Y, LeCain D R, Follett R F, Williams D G. Climate change alters stoichiometry of phosphorus and nitrogen in a semiarid grassland. New Phytologist, 2012, 196(3): 807-815.

[9] 徐露燕, 田大伦, 王光军, 罗赵慧, 叶生晶, 梁贵. 湘潭锰矿栾树叶片和土壤N、P化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(9): 2316-2322.

[10] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征. 植物生态学报, 2014, 38(9): 929-940.

[11] 韩路, 王海珍, 王家强, 柳维杨. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤水盐空间变化与生态影响. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 82-88.

[12] 王文栋, 白志强, 阿里木·买买提, 刘端, 郭忠军. 天山林区6种优势种灌木林生物量比较及估测模型. 生态学报, 2016, 36(9): 2695-2704.

[13] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 贾荣亮, 王增如, 李小军, 李刚. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1340-1348.

[14] 牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化. 植物生态学报, 2013, 37(4): 317-325.

[15] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6538-6547.

[16] 黄小波, 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 郎学东. 云南普洱季风常绿阔叶林152种木本植物叶片C、N、P化学计量特征. 生态学杂志, 2016, 35(3): 567-575.

[17] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.

[18] Li Y L, Jing C, Mao W, Cui D, Wang X Y, Zhao X Y. N and P resorption in a pioneer shrub (*Artemisia halodendron*) inhabiting severely desertified lands of Northern China. Journal of Arid Land, 2014, 6(2): 174-185.

[19] 胡启武, 聂兰琴, 郑艳明, 吴琴, 尧波, 郑林. 沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤C、N、P化学计量特征影响. 生态学报, 2014, 34(9): 2246-2255.

[20] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China. Ecological Engineering, 2015, 76: 57-65.

[21] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究. 环境科学, 2010, 31(8): 1716-1725.

[22] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.

[23] 李婷, 邓强, 袁志友, 焦峰. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. 环境科学, 2015, 36(8): 2988-2996.

[24] 邓雄, 李小明, 张希明, 叶万辉. 4种荒漠植物气体交换特征的研究. 植物生态学报, 2002, 26(5): 605-612.

[25] 张瑞群, 马晓东, 吕豪豪. 多枝柽柳幼苗生长及其根系解剖结构对水盐胁迫的响应. 草业科学, 2016, 33(6): 1164-1173.

[26] 宋彦涛, 周道玮, 李强, 王平, 黄迎新. 松嫩草地80种草本植物叶片氮磷化学计量特征. 植物生态学报, 2012, 36(3): 222-230.

[27] 郝媛媛, 颉耀文, 张文培, 宁宝山, 路新军. 荒漠黑果枸杞研究进展. 草业科学, 2016, 33(9): 1835-1845.

[28] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 安树青, 冷欣. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片C、N、P化学计量特征. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1054-1061.

[29] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 林勇明, 马瑞丰, 俞伟, 王道杰, 吴承祯, 洪伟. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687.

[30] Li Y Q, Zhao X Y, Zhang F X, Awada T, Wang S K, Zhao H L, Zhang T H, Li Y L. Accumulation of soil organic carbon during natural restoration of desertified grassland in China's Horqin Sandy Land. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 328-340.

[31] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21.

[32] Cheng M, An S S. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China. Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 216-223.

[33] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. Plant and Soil, 2013, 373(1): 553-568.

[34] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.

[35] Ren C J, Zhao F Z, Kang D, Yang G H, Han X H, Tong X G, Feng Y Z, Ren G X. Linkages of C:N:P stoichiometry and bacterial community in soil following afforestation of former farmland. Forest Ecology and Management, 2016, 376: 59-66.

[36] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China. Journal of Arid Land, 2015, 7(3): 341-349.

[37] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 CNP 的化学计量特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5760-5767.

[38] 郭子武, 陈双林, 杨清平, 李迎春. 雷竹林土壤和叶片 N、P 化学计量特征对林地覆盖的响应. 生态学报, 2012, 32(20): 6361-6368.

[39] 戚德辉, 温仲明, 王红霞, 郭茹, 杨士梭. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应. 生态学报, 2016, 36(20): 6420-6430.

[40] Yan K, Duan C Q, Fu D G, Li J, Wong M H G, Qian L, Tian Y X. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of plant communities in geochemically phosphorus-enriched soils in a subtropical mountainous region, SW China. Environmental Earth Science, 2015, 74(5): 3867-3876.